

การปรับปรุงประสิทธิภาพการตรวจวัดการสั่นสะเทือนระดับต่ำของโครงสร้าง ด้วยระบบตรวจสอบสมรรถภาพของโครงสร้างต้นทุนต่ำ

Improving the Performance of Low-Level Vibration Measurement of Structures with a Low-Cost Structural Health Monitoring System

อมรเทพ จิรศักดิ์จำรูญศรี^{1*} นคร ภู่วโรดม² และ สุเพชร จิรขจรกุล³

^{1,3}สาขาวิชาเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี

*Corresponding author; E-mail address: amorntep@tu.ac.th

บทคัดย่อ

การตรวจสอบสมรรถภาพของโครงสร้างต่าง ๆ เช่น อาคารขนาดต่าง ๆ สะพาน หรือหอคอยขมเมือง เป็นต้น ทั้งที่เป็นโครงสร้างเก่าที่มีความสำคัญ หรือโครงสร้างใหม่ที่ต้องการให้ผู้ใช้งานเกิดความมั่นใจต่อการใช้งาน จำเป็นต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์วัดระดับการสั่นสะเทือนของโครงสร้างตลอดเวลา เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำรูปแบบต่าง ๆ ปัจจุบันการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการสั่นสะเทือนบนโครงสร้างยังไม่ได้ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากอุปกรณ์ตรวจวัดการสั่นสะเทือนที่มีความละเอียดสูงมักมีราคาสูง นอกจากนี้ การพัฒนาอุปกรณ์สำหรับตรวจสอบสมรรถภาพของโครงสร้างที่มีต้นทุนต่ำ อาจมีข้อจำกัดเรื่องความสามารถในการวัดการสั่นสะเทือนระดับต่ำของโครงสร้างอาจทำได้ไม่เต็มที่ ดังนั้น การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการตรวจวัดการสั่นสะเทือนระดับต่ำของโครงสร้างด้วยระบบตรวจสอบสมรรถภาพของโครงสร้างต้นทุนต่ำให้ดีขึ้นและมีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการนำไปใช้งานจริงบนโครงสร้างประเภทต่าง ๆ ในอนาคต ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนอุปกรณ์วัดระดับการสั่นสะเทือนเป็น 2 ชุด สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดการสั่นสะเทือนระดับต่ำได้ดีขึ้น โดยเฉลี่ยประมาณ 10-15 %

คำสำคัญ: การสั่นสะเทือนของโครงสร้าง, การสั่นสะเทือนระดับต่ำ, ระบบตรวจสอบสมรรถภาพของโครงสร้างต้นทุนต่ำ

Abstract

Monitoring the performance of various structures such as buildings of different sizes, bridges, or observation towers, whether they are old structures that are historically significant or new structures that need to have user confidence in their use. To do this, it is necessary to have measuring equipment installed to always monitor the vibration of the structures. This data can

then be analyzed to determine the responses of structures from different types of loading. Currently, the use of vibration monitoring equipment on structures is not widely used due to the high cost of high precision of the equipment. Additionally, there may be limitations in developing lower-cost equipment for monitoring the performance of structures, especially for the low-level of vibration. Therefore, this study aims to improve the performance of low-level vibration monitoring of structures using a low-cost structural health monitoring system and to make it sufficient for practical use on various types of structures in the future. The results from this study found that increasing the number of vibration measuring devices to two sets can improve the efficiency of detecting low-level vibrations. On average, the improvement is approximately about 10-15%.

Keywords: Vibration of Structures, Low-Level Vibration, Low-Cost Structural Health Monitoring System

1. บทนำ

โครงสร้างอาคาร สะพาน หรือระบบสาธารณูปโภคขนาดใหญ่ ที่มีการใช้เงินลงทุนในการก่อสร้างจำนวนมากและมีความคาดหวังว่าจะสามารถใช้งานหรือให้บริการได้เป็นระยะเวลาที่ยาวนาน ซึ่งวัสดุที่นำมาใช้ในแต่ละโครงสร้างรวมถึงรูปร่างอาจมีความแตกต่างกัน ส่งผลให้พฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำรูปแบบต่าง ๆ มีความแตกต่างกันได้ การตรวจสอบสภาพปัจจุบันของโครงสร้างดังกล่าวจึงมีความสำคัญและมีความจำเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะโครงสร้างที่มีความสำคัญหรืออาคารที่มีประชาชนใช้งานจำนวนมาก เนื่องจาก หากเกิดความเสียหายเกิดขึ้น อาจส่งผลกระทบต่อผู้ใช้งานจำนวนมาก ดังนั้น การติดตั้งระบบตรวจสอบสภาพหรือสมรรถนะของโครงสร้าง เพื่อใช้ติดตามพฤติกรรมของโครงสร้างและประเมินระดับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง จึงมีความสำคัญ

และจำเป็นอย่างยิ่งในปัจจุบัน หากพบว่าโครงสร้างอยู่ในสถานะที่ไม่ปลอดภัยหรือมีความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นได้ สามารถดำเนินการแก้ไข ซ่อมบำรุง หรือแจ้งเตือนผู้ใช้งานได้ทันเวลา

การตรวจสอบสภาพหรือสมรรถนะของโครงสร้าง (Structural Health Monitoring, SHM) คือ ระบบที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างอย่างต่อเนื่อง เพื่อประเมินสมรรถนะของโครงสร้าง หากพบความผิดปกติเกิดขึ้นหรือระดับการโยกตัวเกินกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ สามารถแจ้งเตือนไปยังผู้ใช้งานได้ทันที หรือสามารถแจ้งผู้ที่เกี่ยวข้องเข้าไปซ่อมบำรุงให้กลับมาใช้งานได้ตามปกติ [1-2]

อย่างไรก็ตาม การติดตั้งระบบ SHM จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือนที่มีความละเอียดสูงในการติดตั้งไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ของโครงสร้าง เพื่อเก็บข้อมูล ณ เวลาต่าง ๆ สำหรับนำไปวิเคราะห์ผลตอบสนองของโครงสร้าง แต่ข้อจำกัดของการติดตั้งระบบ SHM ในปัจจุบัน คือ ต้นทุนการติดตั้งที่มีราคาสูง จึงทำให้ยังไม่ได้รับความนิยมติดตั้งระบบ SHM อย่างแพร่หลายในประเทศ แต่ด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบันมีการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดการสั่นสะเทือนที่มีราคาถูกลงหลายเท่าตัวเพิ่มขึ้น ทำให้มีโอกาสที่เจ้าของโครงสร้างหรือเจ้าของอาคารจะนำไปติดตั้งเพิ่มขึ้นได้ในอนาคต [3-4]

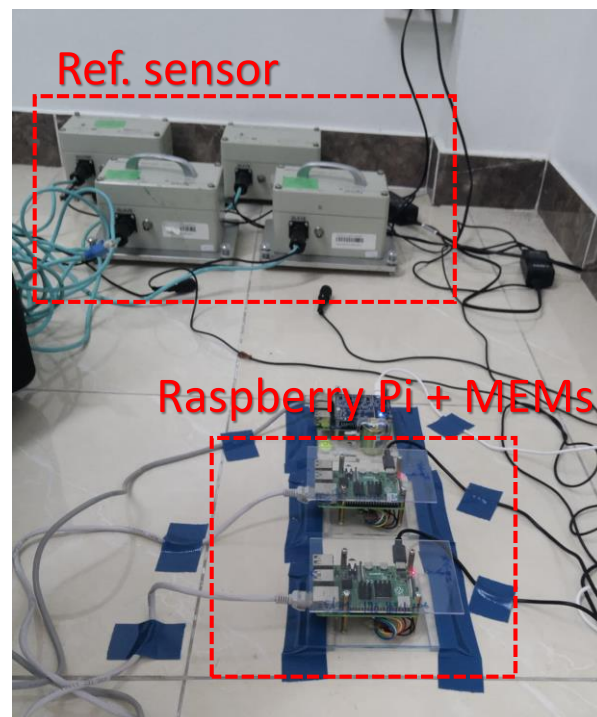
ถึงแม้ว่า การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดการสั่นสะเทือนต้นทุนต่ำมีการพัฒนาเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน แต่ระดับความละเอียดของเครื่องมือหรือขีดความสามารถของเครื่องมือ โดยเฉพาะการสั่นสะเทือนระดับต่ำ (Low Amplitude) [5] ซึ่งระดับการสั่นสะเทือนระดับต่ำของโครงสร้างคือการสั่นสะเทือนของโครงสร้างที่มนุษย์ไม่สามารถรับรู้หรือรู้สึกได้ โดยมีค่าความเร่งต่ำกว่า 0.05 m/s^2 (0.0051 g) [6] โดยเกิดจากการสั่นสะเทือนตามธรรมชาติ (Ambient Vibration), การสั่นสะเทือนที่มาจากอาคารจราจรหรือกิจกรรมต่าง ๆ ที่ส่งผลทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้นในโครงสร้าง เป็นต้น การสั่นสะเทือนระดับต่ำดังกล่าวข้างต้นยังเป็นข้อจำกัดที่สำคัญเรื่องหนึ่งของการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดการสั่นสะเทือนต้นทุนต่ำ ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการนำไปใช้งาน ดังนั้น บทความนี้จึงได้เสนอแนวทางปรับปรุงประสิทธิภาพการตรวจวัดการสั่นสะเทือนระดับต่ำ ของโครงสร้างด้วยระบบตรวจสอบสมรรถภาพของโครงสร้างต้นทุนต่ำให้ดีขึ้นและมีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการนำไปใช้งานจริงบนโครงสร้างประเภทต่าง ๆ ในอนาคต

2. วิธีการศึกษา

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจวัดการสั่นสะเทือนของโครงสร้างต้นทุนต่ำ ในกรณีที่ ต้องการตรวจวัดการสั่นสะเทือนระดับต่ำ (Low Amplitude) ซึ่งการศึกษานี้ได้พัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดการสั่นสะเทือนของโครงสร้างต้นทุนต่ำขึ้นมา โดยเลือกใช้ MEMEs ดังรูปที่ 1 ซึ่งเป็นเซนเซอร์วัดความเร่งขนาดเล็กและราคาถูก โดยมีจุดเด่น คือ 1) ช่วงการวัดตั้งแต่ $\pm 2 \text{ g}$ ถึง $\pm 8 \text{ g}$ 2) บริโภคพลังงานต่ำ 3) ความถี่ในการเก็บข้อมูลสูงถึง $4,000 \text{ Hz}$ 4) AD converter 20 bit 5) Sensitivity สำหรับ $\pm 2 \text{ g}$ คือ $256,000 \text{ LSB/g}$ [7] โดยเซนเซอร์

ดังกล่าวใช้งานร่วมกับ Raspberry Pi ซึ่งเป็นบอร์ดคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กบริโภคพลังงานต่ำ สามารถเขียนโปรแกรมควบคุมเซนเซอร์ที่ต้องการได้ ใช้งานระยะเวลานานได้ดี และมีราคาประหยัด โดยมีราคาต่อชุดประมาณ 25,000 บาท และเปรียบเทียบผลการตรวจวัดที่ได้กับอุปกรณ์อ้างอิงที่ได้มาตรฐานและมีความสามารถตรวจวัดการสั่นสะเทือนของโครงสร้างระดับต่ำได้เป็นอย่างดี ซึ่งเป็นเซนเซอร์วัดความเร่งเช่นเดียวกัน โดยมีคุณสมบัติเบื้องต้น คือ 1) ช่วงการวัด $\pm 4 \text{ g}$ 2) ช่วงความถี่ในการเก็บข้อมูล DC ถึง 100 Hz 3) AD converter 24 bit 4) Resolution น้อยกว่า 10 mGal-p (Sampling : $100 \text{ Hz} / 2000 \text{ Gal full scale}$) [8] โดยมีราคาต่อชุดประมาณ 250,000 บาท

สำหรับการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างอุปกรณ์ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นกับอุปกรณ์ที่ได้มาตรฐานในการศึกษานี้ กระทำโดยการเปรียบเทียบค่าความเร่งแบบประวัติเวลา (Acceleration Time History) และความสอดคล้อง (Coherency) ระหว่างการใช้อุปกรณ์ต้นแบบเพียง 1 ชุด กับค่าเฉลี่ยของอุปกรณ์ต้นแบบจำนวน 2 ชุด โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือนทั้งหมดบนอาคารหลังหนึ่งที่มีความสูง 3 ชั้น โดยการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดได้มากจากการสั่นสะเทือนตามธรรมชาติของอาคาร และการสั่นสะเทือนที่มาจากการทำงานของอาคาร รวมถึงการสั่นสะเทือนเนื่องจากการจราจรจากประเภทต่าง ๆ ที่สัญจรใกล้บริเวณอาคารที่ทดสอบ



รูปที่ 1 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการสั่นสะเทือนต้นแบบกับอุปกรณ์อ้างอิง

สำหรับรายละเอียดของทฤษฎีการวิเคราะห์ค่าความสอดคล้อง (Coherency) แสดงได้ดังนี้

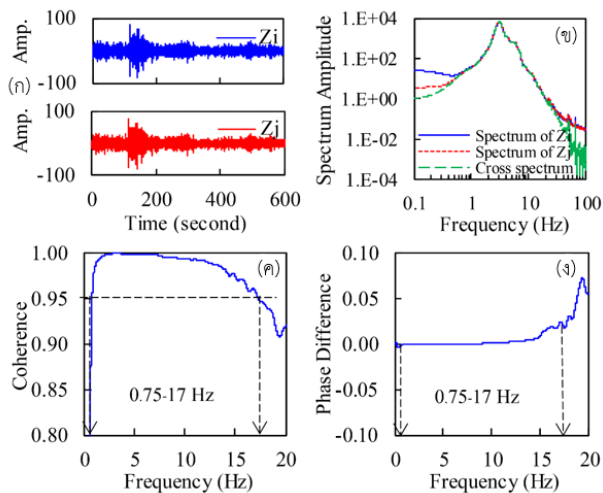
2.1 การวิเคราะห์ความสอดคล้อง (Coherency)

ขั้นตอนนี้ดำเนินการเพื่อตรวจสอบความสอดคล้องกันของข้อมูลและช่วงความถี่ที่สามารถใช้ได้ระหว่างอุปกรณ์ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นกับอุปกรณ์อ้างอิงที่ได้มาตรฐานหากมีการนำมาใช้ร่วมกัน โดยการวางเครื่องมือวัดทุกชุดที่ตำแหน่งเดียวกันหรือใกล้กันมากที่สุด เพื่อให้แน่ใจว่าสัญญาณที่เครื่องมือแต่ละชุดเป็นสัญญาณชุดเดียวกัน และทำการเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนของพื้นทั้ง 3 ทิศทาง (แนวททาง 2 ทิศทางที่ตั้งฉากกัน และแนวตั้ง 1 ทิศทาง) สำหรับการวิเคราะห์หาความสอดคล้องหรือ Coherence ของเครื่องมือสามารถคำนวณได้จาก Spectrum และ Cross-Spectrum ของเครื่องมือวัดแต่ละคู่ สมการที่ (1) และสมการที่ (2) แสดงวิธีการคำนวณหาค่า Coherency และ Phase Different สำหรับเครื่องมือวัดแต่ละคู่ตามลำดับสมการ

$$Coherency = \text{real} \left(\frac{P_{XY}}{\sqrt{P_{XX} \cdot P_{YY}}} \right) \quad (1)$$

$$Phase \text{ Different} = \frac{\tan^{-1} \left(\frac{\text{img}(P_{XY})}{\text{real}(P_{XY})} \right)}{\sqrt{P_{XX} \cdot P_{YY}}} \quad (2)$$

โดยที่ P_{XY} , P_{XX} , และ P_{YY} คือ Cross-Spectrum สำหรับเครื่องมือคู่ที่พิจารณา และ Spectrum ของเครื่องมือชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ตามลำดับ รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ความสอดคล้องกันของเครื่องมือและช่วงความถี่ที่สามารถนำมาใช้งานได้ระหว่างเซนเซอร์แต่ละคู่



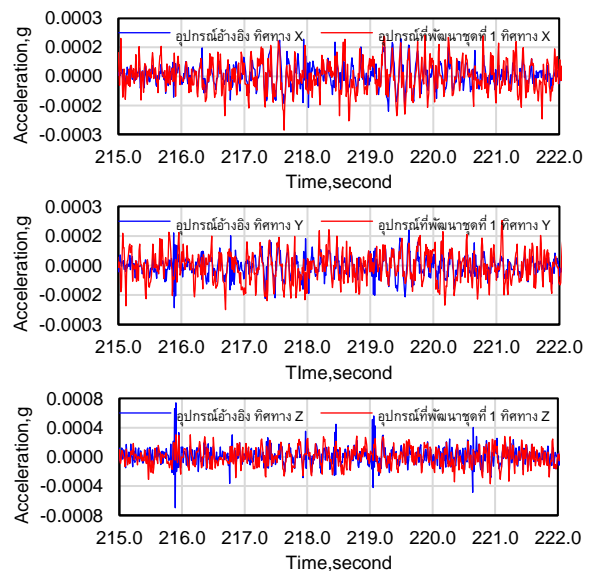
รูปที่ 2 แผนผังแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ Coherence

ตัวอย่างการวิเคราะห์ความสอดคล้องระหว่างอุปกรณ์ตรวจวินชุดที่ 1 และชุดที่ 2 แสดงในรูปที่ 2 ประกอบด้วย ตัวอย่างสัญญาณการตรวจวัดจากอุปกรณ์ทั้ง 2 ชุด (รูปที่ 2ก), ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณการตรวจวัดจากอุปกรณ์ชุดที่ 1, 2 และผลการวิเคราะห์ Cross-Spectrum ระหว่างสัญญาณการตรวจวัดจากอุปกรณ์ชุดที่ 1 และ 2 (รูปที่ 2ข) สำหรับ

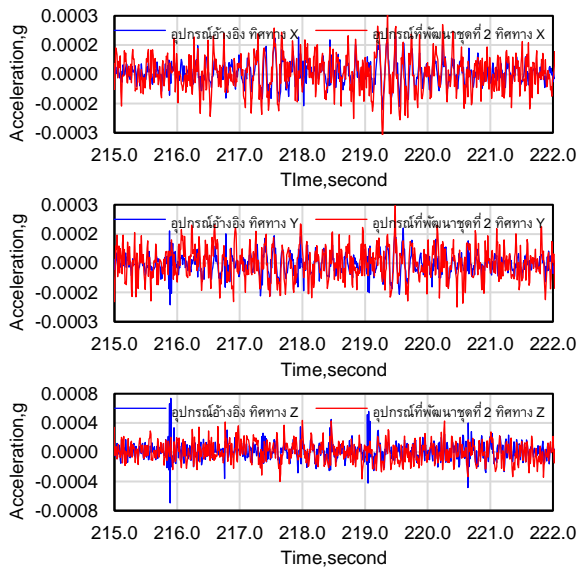
รูปที่ 2ค คือ ผลการวิเคราะห์ค่าความสอดคล้อง โดยแกนนอน คือ ความถี่ และแกนตั้ง คือ ค่าความสอดคล้อง หากช่วงความถี่ใดมีค่าความสอดคล้องเข้าใกล้ 1 หรือเท่ากับ 1 หมายถึง สัญญาณระหว่างอุปกรณ์ทั้ง 2 มีความสอดคล้องกันดีมาก ซึ่งจากตัวอย่างข้อมูลที่น่าวิเคราะห์ หากกำหนดค่าความสอดคล้องกันของข้อมูลไว้ที่ระดับ 95% หรือ 0.95 พบว่า ช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานได้หรือข้อมูลมีความสอดคล้องกันคือช่วงความถี่ประมาณ 0.75-17Hz ซึ่งหากพิจารณาผลการวิเคราะห์ความต่างเฟส ในรูปที่ 2ง ในช่วงความถี่ดังกล่าวจะมีค่าที่ต่ำด้วยเช่นกัน

3. ผลการศึกษา

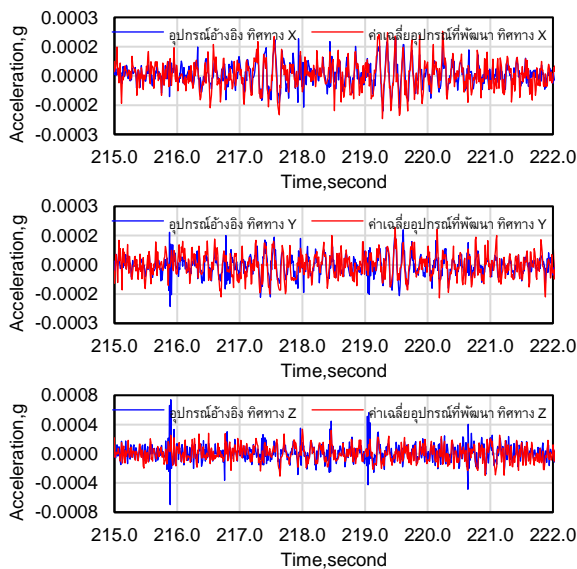
ผลการศึกษาประกอบด้วย ผลการเปรียบเทียบค่าความเร่งแบบประวัติเวลา (Acceleration Time History) และผลการวิเคราะห์ความสอดคล้องกันของการสั่นสะเทือนแต่ละทิศทาง (X, Y, และ Z) ระหว่างอุปกรณ์ต้นแบบที่พัฒนาชุดที่ 1 และชุดที่ 2 กับอุปกรณ์อ้างอิงที่ได้มาตรฐาน รูปที่ 3 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความเร่งแบบประวัติเวลาระหว่างอุปกรณ์ต้นแบบชุดที่ 1 กับอุปกรณ์อ้างอิง, รูปที่ 4 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความเร่งแบบประวัติเวลาระหว่างอุปกรณ์ต้นแบบชุดที่ 2 กับอุปกรณ์อ้างอิง, รูปที่ 5 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความเร่งแบบประวัติเวลาค่าเฉลี่ยของอุปกรณ์ต้นแบบทั้ง 2 ชุด กับอุปกรณ์อ้างอิง



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบค่าความเร่งแบบประวัติเวลาระหว่างอุปกรณ์ต้นแบบชุดที่ 1 กับอุปกรณ์อ้างอิง (บน) ทิศทาง X, (กลาง) ทิศทาง Y และ (ล่าง) ทิศทาง Z



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบค่าความเร่งแบบประวัติเวลาระหว่างอุปกรณ์ต้นแบบชุดที่ 2 กับอุปกรณ์อ้างอิง (บน) ทิศทาง X, (กลาง) ทิศทาง Y และ (ล่าง) ทิศทาง Z



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบค่าความเร่งแบบประวัติเวลาระหว่างค่าเฉลี่ยของอุปกรณ์ต้นแบบจำนวน 2 ชุด กับอุปกรณ์อ้างอิง (บน) ทิศทาง X, (กลาง) ทิศทาง Y และ (ล่าง) ทิศทาง Z

ผลการเปรียบเทียบในรูปที่ 3-5 อาจเห็นถึงความแตกต่างระหว่างอุปกรณ์ต้นแบบที่พัฒนา กับอุปกรณ์อ้างอิงได้ไม่ชัดเจนเท่าที่ควร แต่อย่างไรก็ตาม ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยจากอุปกรณ์ต้นแบบที่พัฒนาจำนวน 2 ชุด มีแนวโน้มที่เข้าใกล้ค่าความเร่งที่ตรวจวัดได้ด้วยอุปกรณ์อ้างอิงมากกว่าการใช้อุปกรณ์ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นชุดใดชุดหนึ่งเท่านั้น

รูปที่ 6 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความสอดคล้องกันของเครื่องมือระหว่างอุปกรณ์ต้นแบบที่พัฒนาชุดที่ 1 ชุดที่ 2 และค่าเฉลี่ยจากอุปกรณ์

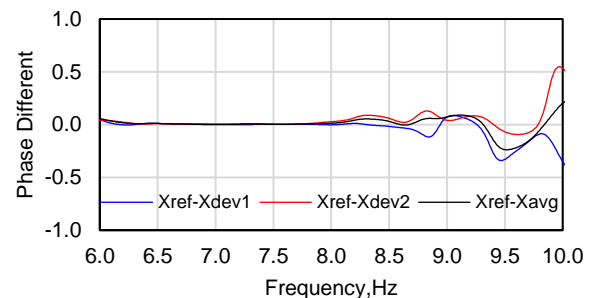
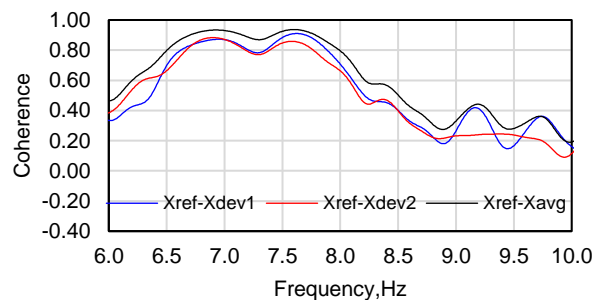
ต้นแบบที่พัฒนาจำนวน 2 ชุด กับอุปกรณ์ที่ได้มาตรฐาน ตามลำดับ สำหรับทิศทาง X

รูปที่ 7 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความสอดคล้องกันของเครื่องมือระหว่างอุปกรณ์ต้นแบบที่พัฒนาชุดที่ 1 ชุดที่ 2 และค่าเฉลี่ยจากอุปกรณ์ต้นแบบที่พัฒนาจำนวน 2 ชุด กับอุปกรณ์ที่ได้มาตรฐาน ตามลำดับ สำหรับทิศทาง Y

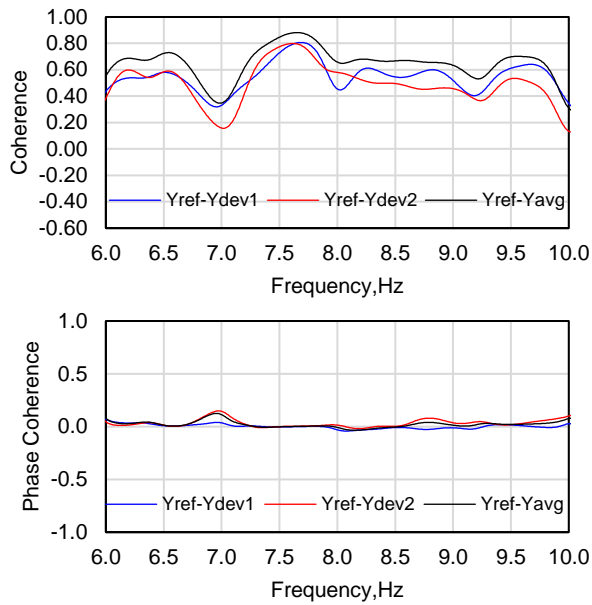
รูปที่ 8 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความสอดคล้องกันของเครื่องมือระหว่างอุปกรณ์ต้นแบบที่พัฒนาชุดที่ 1 ชุดที่ 2 และค่าเฉลี่ยจากอุปกรณ์ต้นแบบที่พัฒนาจำนวน 2 ชุด กับอุปกรณ์ที่ได้มาตรฐาน ตามลำดับ สำหรับทิศทาง Z

ค่าความสอดคล้องหรือ Coherence ของข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัดแต่ละคู่แสดงให้เห็นถึงความเข้ากันของข้อมูลในช่วงความถี่ที่ใช้ได้ หากค่า Coherence มีค่าเท่ากับ 1 หมายถึงข้อมูลทุกความถี่สอดคล้องกันดีมาก แต่หากมีสัญญาณรบกวน หรือประสิทธิภาพของเครื่องมือแตกต่างกัน ค่า Coherence ในแต่ละความถี่จะมีค่าต่ำกว่า 1 ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ควบคู่มา กับค่า Coherence คือค่าความต่างเฟส (Phase Different) ซึ่งค่าทั้ง 2 จะมีความสอดคล้องและสัมพันธ์กัน กล่าวคือ หากช่วงความถี่ใดข้อมูลมีความสอดคล้องกันดี ค่าความต่างเฟสจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ในขณะที่ หากช่วงความถี่ใดมีค่า Coherence ต่ำ ค่าความต่างเฟสจะมีค่าสูงขึ้น

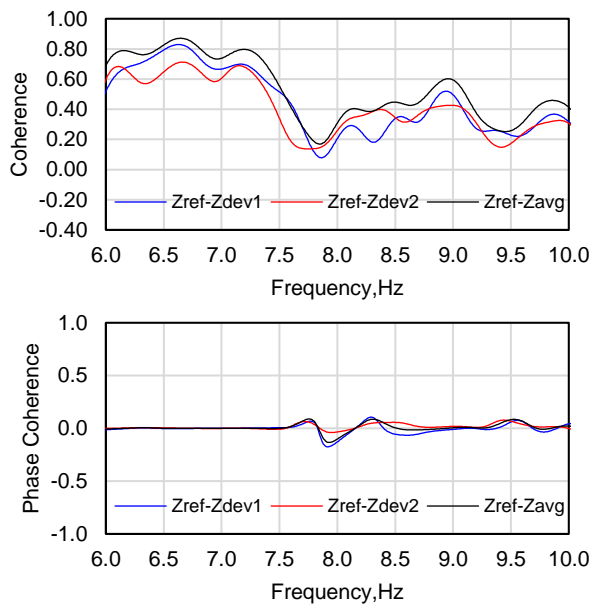
กำหนดให้ X_{ref} , Y_{ref} และ Z_{ref} คือ ผลการวิเคราะห์จากข้อมูลอุปกรณ์อ้างอิง ในทิศทาง X, Y และ Z ตามลำดับ ส่วน X_{dev1} , X_{dev2} , Y_{dev1} , Y_{dev2} , Z_{dev1} และ Z_{dev2} คือ ผลการวิเคราะห์จากข้อมูลอุปกรณ์ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ในทิศทาง X, Y และ Z ตามลำดับ ในขณะที่ X_{avg} , Y_{avg} และ Z_{avg} คือ ผลการวิเคราะห์จากค่าเฉลี่ยของอุปกรณ์ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นทั้ง 2 ชุด



รูปที่ 6 ผลการเปรียบเทียบ (บน) ค่าความสอดคล้อง (Coherence) และ (ล่าง) ค่าความต่างเฟสของความสอดคล้อง (Phase Different) ในทิศทาง X



รูปที่ 7 ผลการเปรียบเทียบ (บน) ค่าความสอดคล้อง (Coherence) และ (ล่าง) ค่าความต่างเฟสของความสอดคล้อง (Phase Different) ในทิศทาง Y



รูปที่ 8 ผลการเปรียบเทียบ (บน) ค่าความสอดคล้อง (Coherence) และ (ล่าง) ค่าความต่างเฟสของความสอดคล้อง (Phase Different) ในทิศทาง Z

จากผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบ Coherence และ Phase Different ในรูปที่ 6 ถึงรูปที่ 8 พบว่า การใช้ข้อมูลจากอุปกรณ์ต้นแบบที่พัฒนาเพียง 1 ชุด เพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลจากอุปกรณ์อ้างอิง มีประสิทธิภาพน้อยกว่าการใช้ค่าเฉลี่ยจากอุปกรณ์ต้นแบบที่พัฒนาจำนวน 2 ชุด ในทุกทิศทางของการตรวจวัดการสั่นสะเทือน ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่า หากนำอุปกรณ์อ้างอิงและอุปกรณ์ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมาใช้งานร่วมกัน ช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานได้หากนำอุปกรณ์

ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นไปใช้คู่กับอุปกรณ์อ้างอิงที่ได้มาตรฐานจากข้อมูลในการศึกษาครั้งนี้ได้อยู่ในช่วง 6.5 – 8 Hz สำหรับทิศทาง X สำหรับทิศทาง Y ช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานได้ในช่วง 6.0 – 9.5 Hz และสำหรับทิศทาง Z ช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานได้ในช่วง 6.0 – 7.5 Hz ซึ่งช่วงความถี่ดังกล่าวเป็นช่วงที่มีค่า Coherence ที่สูงกว่า 0.60 หรือสอดคล้องกับอุปกรณ์อ้างอิงประมาณ 60% และมีค่า Phase Different ที่ต่ำ สำหรับช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์อ้างอิงที่มีความแตกต่างกันในแต่ละทิศทาง ขึ้นอยู่กับระดับการสั่นสะเทือนที่อุปกรณ์สามารถตรวจวัดได้ โดยจะเห็นว่าช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานได้ของทิศทาง Y มีความกว้างมากกว่าทิศทาง X และ Z เนื่องจาก ทิศทาง Y เป็นทิศทางที่อาคารตัวอย่างมีความอ่อนตัวกว่า หรือมีค่าความถี่ธรรมชาติต่ำกว่า ดังนั้นการสั่นสะเทือนในทิศทาง Y จึงเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า ทำให้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับอุปกรณ์อ้างอิงแล้วช่วงความถี่ที่สามารถใช้ได้จึงมีความชัดเจนและมีความกว้างของความถี่มากกว่าทิศทางอื่น ๆ นอกจากนี้ การสั่นสะเทือนในทิศทาง Z เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์อ้างอิงแล้วพบว่ามีความถี่ที่สามารถใช้งานได้ดีต่ำกว่าทิศทางอื่น เนื่องจากข้อจำกัดของเซนเซอร์ที่นำมาใช้งานในอุปกรณ์ต้นแบบ ซึ่งมีค่า Resolution ต่ำกว่าทิศทาง X และ Y นอกจากนี้ระดับการสั่นสะเทือนในทิศทาง Z ของอาคารดังกล่าวมีค่าต่ำและมีความถี่สูงกว่าทิศทาง X และ Y ด้วยเช่นกัน

4. สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอแนะแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพการตรวจวัดการสั่นสะเทือนระดับต่ำ (Low Amplitude) ของโครงสร้างด้วยระบบตรวจสอบสมรรถภาพของโครงสร้างต้นแบบให้ดีขึ้นและมีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการนำไปใช้งานจริงบนโครงสร้างประเภทต่าง ๆ ในอนาคต โดยการพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับวัดการสั่นสะเทือนของโครงสร้าง ซึ่งเป็นชุดอุปกรณ์ที่หาซื้อได้ง่ายและมีต้นทุนต่ำ รวมถึงมีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการใช้งานโดยทั่วไป และนำมาเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนของโครงสร้างตัวอย่างพร้อมกับอุปกรณ์อ้างอิงที่ได้มาตรฐานซึ่งสามารถตรวจวัดการสั่นสะเทือนระดับต่ำได้เป็นอย่างดี โดยราคากระหว่างอุปกรณ์ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นกับอุปกรณ์อ้างอิงที่ได้มาตรฐานต่างกันประมาณ 10 เท่า สำหรับการเปรียบเทียบในการศึกษานี้ประกอบด้วย การเปรียบเทียบค่าความเร่งในรูปแบบของประวัติเวลา (Acceleration Time History) และค่าความสอดคล้อง (Coherence) รวมถึงค่าความต่างเฟส (Phase Different) ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้ 1) การใช้อุปกรณ์ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นเพียง 1 ชุด ประสิทธิภาพในการวัดการสั่นสะเทือนระดับต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์อ้างอิงแล้วอาจไม่คุ้มค่าที่ควร และ 2) การใช้อุปกรณ์ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมากกว่า 1 ชุด โดยในการศึกษานี้ใช้จำนวน 2 ชุด สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดการสั่นสะเทือนระดับต่ำได้ดีขึ้น โดยมีประสิทธิภาพดีขึ้นจากการใช้เพียง 1 ชุด โดยเฉลี่ยประมาณ 10-15 %

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอุปกรณ์ตรวจวัดการสั่นสะเทือนต้นแบบมากกว่า 1 ชุด สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดการ

สั่นสะเทือนระดับต่ำได้ดีขึ้น และมีแนวโน้มที่จะมีค่าเข้าใกล้อุปกรณ์ตรวจวัดอ้างอิงที่มีราคาสูงได้ดีขึ้น

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าการเพิ่มอุปกรณ์ตรวจวัดการสั่นสะเทือนต้นทุนต่ำมากขึ้นมีแนวโน้มที่จะมีประสิทธิภาพในการตรวจวัดที่ดีขึ้น แต่ควรพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายที่ตามมา และขนาดของอุปกรณ์ที่อาจมีขนาดใหญ่ขึ้นจนไม่สามารถใช้งานได้อย่างสะดวก ดังนั้นควรทำการพิจารณาวัสดุประสงค์ในการใช้งานเป็นหลัก เช่น หากต้องการตรวจวัดการสั่นสะเทือนเฉพาะช่วงที่มีลมพายุรุนแรง หรือช่วงที่อาจมีเหตุการณ์แผ่นดินไหวเกิดขึ้น ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวจะส่งผลทำให้โครงสร้างหรืออาคารมีการโยกตัวมากกว่าปกติอยู่แล้ว ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ต้นทุนต่ำโดยการเพิ่มจำนวนชุดในการติดตั้งอาจไม่มีความจำเป็นในกรณีนี้ เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นผลงานวิจัยที่ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย ประเภททุนวิจัยพัฒนาศักยภาพผลงานวิจัย (Fast Track) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ตามสัญญาเลขที่ TUFT 72/2564

เอกสารอ้างอิง

- [1] Fujino, Y. (2018). Vibration-based monitoring for performance evaluation of flexible civil structures in Japan. *Proc Jpn Acad Ser B Phys Biol Sci.* 94(2), pp.98-128, doi: 10.2183/pjab.94.008.
- [2] Tsuchihashi, T., Yasuda, M. (2017). Rapid diagnosis systems using accelerometers in seismic damage of tall building. *International journal of high-rise building*, 6(3), pp. 207-216.
- [3] Mahmud, M.A., Bates, K., Wood, T., Abdelgawad, A., Yelamarthi, K. (2018). A complete Internet of Things (IoT) platform for Structure Health Monitoring (SHM). *2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, Singapore, 2018, pp. 275-279, doi: 10.1109/WF-IoT.2018.8355094.
- [4] Muttillio, M., Stornelli, V., Alaggio, R., Paolucci, R., Battista, L.D., Rubeis, T.D., and Ferri, G. (2020). Structural health monitoring: An IoT sensor system for structural damage indicator evaluation. *Sensors*, 20, 4908. <https://doi.org/10.3390/s20174908>.
- [5] Dang, J., Zuo, R., Goit, C.S. (2020). Time control experimental verification of IoT based structural seismic monitoring. *17th World Conference on Earthquake Engineering*, Japan, 13-18 September 2020.
- [6] Vishwakarma, A., Maru, S. (2019). Assessment of human comfort criteria of tall building under dynamic wind loading. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 9(2), pp. 2266-2273, doi: 10.35940/ijitee.B6688.129219.

- [7] ANALOG DEVICES. (2016). Low noise, Low drift, Low power, 3-Axis MEMs Accelerometers. *One Technology Way, U.S.A.*, https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL354_355.pdf
- [8] TOKYO SOKUSHIN CO., LTD. (2015). New Network Sensor CV-374A, CV-374B: Earthquake observation and health monitoring. *TOKYO SOKUSHIN CO., LTD.*, https://www.to-soku.co.jp/en/products/memory/pdf/cv374_a-b_e.pdf